LaSalle Beauvais • Institut Polytechnique
Sciences de la Terre, du Vivant et de l'Environnement

Le 19/12/13

Spécialité Agriculture

LES INDICATEURS D'AGRICULTURE DURABLE (IAD)

Estimation des fuites de nitrates en surface et en profondeur à l'échelle de la parcelle

R. ARMAND

Fanny CHEF
Mégane GUILLAUME

Année 2013-2014

Promotion 154 - ASET

Table des matières

Introduction 4
Sources de pollution 4
Diffusion de la pollution 4
Législations pour lutter contre pollution 5
Impacts (santé humaine, environnement et économie) 6
Mesures pour réduire cette pollution 6

Synthèse bibliographique 8
SWAT : Soil & Water Assessment Tool 8
STICS : Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard 9
DAE-G : Diagnostic Agro-Environnemental Géographique 10
MERLIN : Méthode de hiErarchisation du Risque de LIxiviation du Nitrate 11
INDIGO 12

Tableau de synthèse 15

Liste des références bibliographiques 17

Table des illustrations

Figure 1 : Évolution des teneurs en nitrates dans les nappes phréatiques, de 1996 à 2010 (Ministère du développement durable et de l'énergie, 2013.) 4

Figure 2 : Schéma du cycle de l'azote (J.MOLENAT et al., 2012.) 5

Figure 3 : Schéma illustrant les pertes de nitrates évités par un CIPAN (E. JUSTES, 2013.)..... 7

Figure 4 : Agrégation des indicateurs intermédiaires pour évaluer le risque de pollution diffuse des eaux de profondeur par les nitrates..... 10

Figure 5 : Présentation générale de la démarche de construction de l'indicateur azote. Entre parenthèse sont données les pratiques culturales prises en compte. Des caractéristiques des sols st des données climatiques moyennes entrent aussi dans l'estimation des différents types de pertes d'azote 13

Introduction

Sources de pollution

Aujourd'hui la fertilisation azotée des terres agricoles est devenue une pratique courante, voire indispensable, pour de nombreuses exploitations des pays développés. Pour cause, l'azote est l'élément fondamental des protéines, vitamines ou encore de la chlorophylle présents dans les végétaux. Cet élément nutritif est un facteur de croissance mais également de qualité de la production. La fertilisation est donc nécessaire pour éviter les carences et obtenir les meilleures performances agricoles possibles.

Les exploitants ont plusieurs alternatives pour apporter de l'azote sur leurs terres. La méthode d'apport principale est le déversement d'azote minéral, d'origine fossile. La seconde est l'épandage d'effluents d'élevages, apportant de l'azote sous forme organique. En 2012, on estime que 2 000 000 tonnes d'azote minéral, sous forme d'ammonitrates ont été déversées sur les terres en France et 1 700 000 tonnes sous forme organique. Notons également que certaines terres bénéficient des boues de station d'épuration et de sous produits d'industries agro-alimentaires. (D. DELCOUR et al., 2013.)

L'intensification de l'agriculture, traduit par la sur-fertilisation à cause notamment d'une mauvaise gestion des apports, et de la concentration des cheptels, par exemple dans les élevages hors-sol, entraine la pollution des eaux en nitrate en multiple points, impliquant alors une pollution diffuse. En 2012, on estime que 900 000 tonnes d'azote sous forme de nitrates ont été perdus dans les eaux de surface et souterraines. Les nitrates représentent la première source de pollution d'origine agricole (L. ARNAUDET et A.S. BONNET-LEBRUN, 2010.) et évolue différemment dans le temps selon les régions en France (cf. carte ci-dessous).

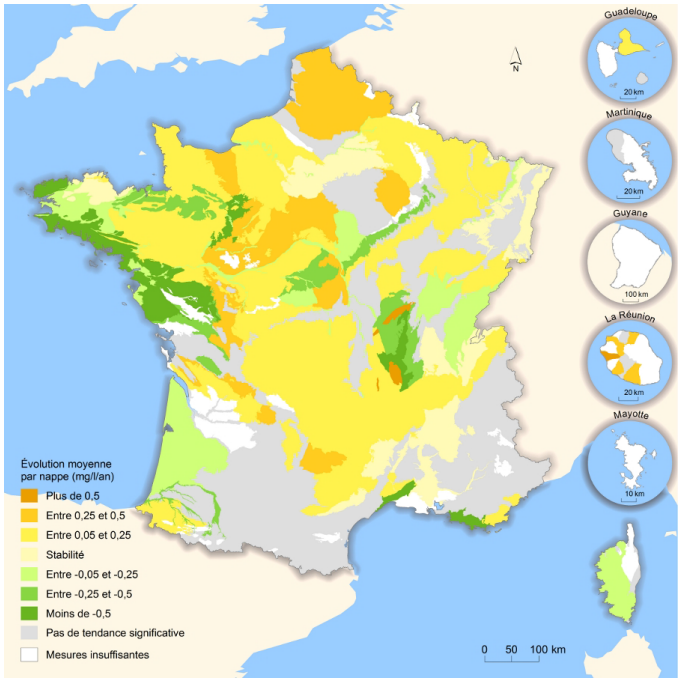

Figure 1 : Évolution des teneurs en nitrates dans les nappes phréatiques, de 1996 à 2010 (Ministère du développement durable et de l'énergie, 2013.)

Diffusion de la pollution

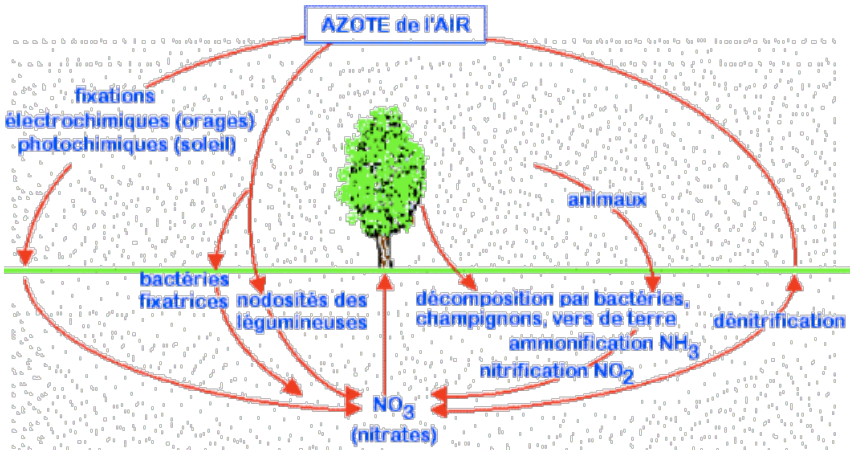

Figure 2 : Schéma du cycle de l'azote (J.MOLENAT et al., 2012.)

La forme de l'azote dans le sol varie en fonction du pH, de la concentration en dioxygène dissout et des communautés biologiques qui s'y trouvent. Toutes formes d'azote peuvent aboutir à la formation de nitrate, suite à l'ammonification et à la nitrification bactérienne ou encore suite à des réactions chimiques.

Les nitrates sont très solubles dans l'eau. (Université virtuelle Environnement et développement durable. 2009.) Ils sont donc peu retenus par le sol. En fonction de la perméabilité du sol, soit ils sont soit transportés par les eaux de sub-surface qui s'écoulent jusqu'à l'exutoire, soit ils sont lessivés par les pluies et donc s'infiltrent et percolent verticalement dans le sol. En moyenne, la migration des nitrates dans le sol progresse d'un mètre par an. (L. ARNAUDET et A.S. BONNET-LEBRUN, 2010) La pollution est alors décalée dans le temps.

Notons que le milieu naturel a la capacité d'épurer l'eau des nitrates au cours des transferts par dénitrification hétérotrophe dans l'eau en surface, ou par dénitrification autotrophe dans les nappes profondes.

Législations pour lutter contre pollution

En octobre 2000, la directive cadre sur l'eau (DCE) été mise en place afin d'uniformiser les législations communautaires sur l'eau. Au sein de cette directive, on trouve la directive « nitrates » (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. 1991.), sur laquelle s'appuie l'Etat pour lutter contre la pollution des nitrates d'origine agricole.

Dans un premier temps, les eaux de surface et souterraines dont la concentration en nitrate est supérieure à 50 mg/L et les zones sensibles à l'eutrophisation ont été identifiées et ont été qualifiées de « zone vulnérable ». En 2012, 55 % de la surface agricole a été classée zone vulnérable. (E. JUSTES, 2013.) Un programme d'action spécifique a été mis en place dans ces zones :

- mise en place d'un code de bonnes pratiques agricoles
- plafonnement de la quantité d'azote organique épandable à 170 kg d'azote par hectare et par an (D. DELCOUR *et al,.* 2013.)
- obligation des exploitants à tenir un plan prévisionnel de fumure définissant l'apport en azote organique et minéral à épandre
- mise en place de bandes enherbées près des cours d'eau exposés

- mise en place obligatoire de CIPAN (couverts intermédiaires pièges à nitrates)

Impacts (santé humaine, environnement et économie)

Les impacts de la pollution par les nitrates ont plusieurs enjeux : environnementaux, de santé publique et économique.

Dans le milieu naturel, les nitrates conjugués à l'abondance en phosphate peuvent induire un phénomène d'eutrophisation des plans d'eau, de rivières ou de zones côtières. Ce phénomène résulte d'un excès de nutriments dans l'eau, ce qui provoque un bloom algal, entrainant à son tour la dégradation de la matière organique morte et donc la diminution de l'oxygène dissout. Le milieu devient alors hypoxique puis anoxique au détriment des organismes aérobies qui ne peuvent plus y vivent. L'eutrophisation a donc un impact direct sur la biodiversité.

Cette pollution pose également un problème de santé publique. Les nitrates présents dans les nappes phréatiques peuvent alimenter les captages d'eau. Il est nécessaire de surveiller leur teneur afin qu'elle ne dépasse pas les 50 mg/L réglementaires (ARVALIS. 2013.), sinon un traitement doit leur être appliqué afin qu'elle soit consommable, potable. En effet, les nitrates sont nocifs pour la santé humaine. Ils sont transformés en nitrites par l'organisme, ce qui réduit la capacité de transport de l'oxygène par l'hémoglobine dans le sang. C'est pourquoi l'exploitation de certains aquifère a du être stoppée à cause d'une pollution trop importante.

Découle de ces deux enjeux, un impact économique non négligeable. Le commissariat général du développement durable (CGDD) estime que la pollution par les nitrates des eaux coute entre 1 et 1,5 milliards d'euros par an. Ce montant s'explique entre autres par le traitement des eaux de captage polluées, le nettoyage des littoraux ou encore par les pertes de recettes touristiques. (D. DELCOUR *et al.* 2013.)

Mesures pour réduire cette pollution

Afin d'inciter les exploitants à réaliser une agriculture plus raisonnée, de nombreuses aides financières provenant du programme de maitrise des pollutions d'origine agricole (PMPOA) ou encore de la politique agricole commune (PAC) leurs ont été distribuées pour diminuer les pollutions diffuses et ponctuelles. Ces aides ont en effet pour but de les aider à gérer au mieux leur fertilisation et à mettre aux normes leurs bâtiments. (E. NOVINCE *et al.,* 2007.)

De plus, leur sensibilisation face à cette problématique et la diffusion des connaissances par le biais de « fiches de bonnes pratiques » ou des diagnostics environnementaux de leur exploitation, est de plus en plus courante, même si certains sont septiques car craignent de ne pas pouvoir maintenir leurs revenus en changeant leurs pratiques. On observe cependant que certains agriculteurs vont jusqu'à se convertir à l'agriculture biologique.

Le levier le plus efficace pour limiter le transfert des nitrates dans les eaux de drainage sont les cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN). L'implantation d'une telle culture après la récolte de la culture principale permet de piéger le nitrate restant dans le sol, généralement en automne et en hiver, lorsque les terres sont les plus soumises au phénomène de drainage. Les CIPAN permettent de réduire la lixiviation des nitrates grâce à leurs racines et donc de diminuer la concentration nitrique de l'eau de drainage. (INRA, 2012.) Leur utilisation permet alors de réduire les pollutions sans affecter le niveau de production.

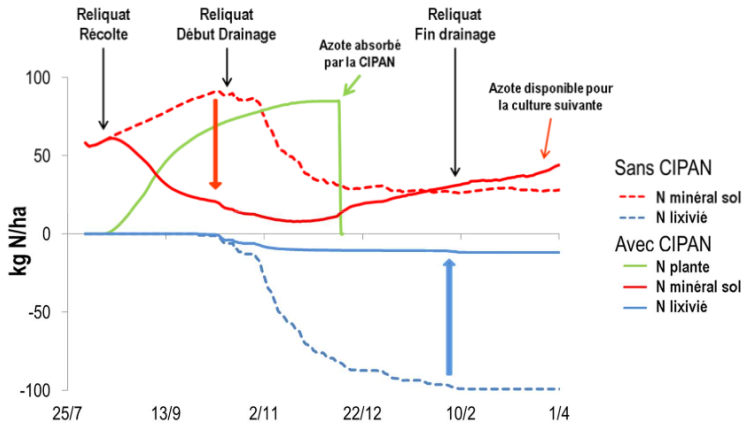

Figure 3 : Schéma illustrant les pertes de nitrates évités par un CIPAN (E. JUSTES, 2013.)

D'autres alternatives pour limiter les pertes de nitrates et les économiser existent :
- fractionner des apports en azote grâce à des outils d'aide à la décision, pour correspondre au mieux aux besoins de la plante,
- fertiliser de façon précise en modernisant le matériel d'épandage (ex : utilisation de systèmes de guidages permettant de réaliser la coupure de tronçon),
- sélectionner les variétés économes ou efficientes vis-à-vis de l'azote

Enfin, il est à noter que les prix des nitrates sont volatils depuis 2007. Ils sont passés d'un indice 100 en 2000 à un indice 205 en 2012. (D. DELCOUR *et al,* 2013.). Cette augmentation est partiellement due à l'augmentation des prix du gaz naturel, nécessaire à sa fabrication. L'augmentation du prix des céréales des dernières années ne compensent pas cette augmentation. Les exploitants sont donc plus soucieux d'économiser cet intrant.

La conjugaison de ces mesures de sensibilisation, des aides financières et de la hausse des prix des intrants se traduisent par la chute de 24 % de l'utilisation de l'azote minéral entre 1994 et 2012, alors que la production agricole a augmentée de 30 %. (D. DELCOUR *et al.,* 2013.)

Aujourd'hui, de nombreux outils ont été développés pour réaliser un bilan précis des fuites de nitrates en surface et en profondeur à différentes échelles : de la parcelle au territoire, en passant par le bassin versant. Quels paramètres prennent-ils en compte ? Quels sont les atouts et les inconvénients de chacun ? Y en a-t-il un plus efficace que les autres ?

Synthèse bibliographique

SWAT : Soil & Water Assessment Tool

Pour estimer les fuites de nitrates en surface et en profondeur à l'échelle de la parcelle, qu'ils s'agissent d'outils, d'indicateurs ou de modèles informatiques, plusieurs méthodes existent.

Par exemple, SWAT est un modèle informatique utilisé en France par le Cemagref pour évaluer les risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole dans les bassins versants (BV). (INRA, 2004) Cet outil peut être combiné à ArcGIS afin de représenter cartographiquement le risque estimé. (BEI, ERE, 2012)

En effet, le programme de SWAT permet de modéliser la variabilité spatiale et temporelle de la dynamique de lixiviation des nitrates (dûe à la présence d'agro-activités) à l'unité de réponse hydrologique (HRU) de niveau avec un pas de temps mensuels. Les HRU sont des zones considérées comme homogènes obtenues par croisement entre le découpage du BV des sous-bassins versants, de l'occupation du sol et de la pédologie.

Comme pour tout modèle informatique, SWAT doit être calibré, validé et on doit effectuer des analyses d'incertitude pour le modèle hydrologique à partir d'une base de données de débit de la rivière considérée et des nitrates.

Les données d'entrée prises en compte pour le modèle SWAT sont les conditions météorologiques, l'hydrologie (réservoir hydrique [aquifère peu profond, aquifère profond, fonte des neige, capacité au champs], débit des rivières), les propriétés physiques du sol (température), la croissance des plantes (fixation symbiotique de l'azote ou utilisation par plantes), les intrants (éléments nutritifs, produits phytosanitaires), les pratiques agricoles (semis, labour, fertilisation [azotée ou organique], irrigation...), les bactéries et les agents pathogènes. (S. Akhavana et al., 2010)

Le calcul des flux d'azote se fait à partir du cycle du nutriment et la perte d'azote dans le sol est calculée dans le modèle SWAT en fonction des récoltes, des eaux de ruissellement, de l'écoulement latéral, de la percolation et de l'érosion.

SWAT fonctionne en trois étapes :
« - la prise en compte de la topographie, par le MNT (Modèle Numérique de Terrain), qui permet de définir le réseau hydrographique et il est possible de choisir les exutoires pour délimiter les sous-bassins versants,
- le croisement des informations relatives à l'occupation du sol et au type de sol. Cela permet de définir les différentes HRU. Plus ces champs sont renseignés précisément, plus le nombre de HRU est grand et plus le modèle est précis. Le modèle peut alors considérer les différentes valeurs d'évapotranspiration selon le type de culture, le type de sol et la gestion culturale,
- la prise en compte des données climatiques : précipitations journalières, températures (min, max, moyenne journalières), humidité relative, vitesse du vent et radiation solaire. » (BEI, ERE, 2012)

Après exécution du modèle, SWAT propose des sorties à différentes échelles de temps (journalière, mensuelle ou annuelle) et d'espace (HRU ou sous-bassin). Celles-ci concernent l'hydrologie (ruissellement, interception par le couvert, évapotranspiration, drainage, percolation, ruissellement de subsurface, retenues, marécages), le climat (température du sol, neige, générateur climatique), la croissance des cultures, la gestion des

pratiques agricoles (irrigation, rotation, pesticides), le transfert de l'eau, la sédimentation et les nutriments.

STICS : Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard

STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) est un autre modèle conçu par N. Brisson *et al*. comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Son principal objectif est de simuler l'effet de la gestion climat, du sol et des cultures sur la production (quantité et qualité) et l'environnement. (INRA, 2009.)

STICS a une construction modulaire, c'est à dire une structure faite de différents modules, chaque module représentant un processus (ou un groupe de processus) survenant dans le système sol-culture et fonctionne avec un pas de temps journalier et est capable d'intégrer les variabilités spatiales et temporelles pour des cultures successives. (Gomez. E. 2002.)

Ses entrées sont donc relatives au climat, au sol et au système de culture. Sept modules sont abordés : le développement et la croissance aérienne des plantes, les composantes du rendement, la croissance racinaire, équilibre hydrique, les conditions climatiques et la balance azotée. (G. JEGOA, J.M. SANCHEZ-PEREZC, 2010.) Il est à noter que le sol est caractérisé par une succession de couches horizontales et chaque couche est caractérisée par sa teneur en eau, de l'azote minéral et de l'azote organique.

La balance azotée est calculée selon différents paramètres. Premièrement, l'origine de l'azote minéralisé est prise en compte en fonction des 3 compartiments de la matière organique (humus, résidus de cultures, biomasse microbienne) dont il provient. La dégradation des résidus de récolte dans la couche du sol dans laquelle ces résidus sont mélangés modifie également les résultats de la minéralisation ou de l'organisation de l'azote primaire. La décroissance de la biomasse microbienne produit à son tour de l'humus et une minéralisation secondaire. Les apports d'azote sous sa forme minérale comprennent les engrais azotés synthétiques (urée, ammonium, nitrate) et l'azote (ammonium, nitrate) des précipitations et de l'irrigation. Leur efficacité est également modélisée ; c'est à dire la fraction restante de l'azote fourni sous sa forme minérale. Deux tiers de cette fraction sont attribués à la réorganisation microbienne, augmentant ainsi la quantité d'humus, tandis qu'un tiers contribue aux pertes d'azote sous formes gazeuses : volatilisation et dénitrification.

Le transfert de l'azote nitrique dans le sol est, quant à lui, simulé par un modèle de type réservoir fonctionnel. Les concentrations d'azote dans le soluté du sol sont calculées pour chaque couche élémentaire. L'eau qui s'écoule à partir d'une couche (Z) à la couche immédiatement inférieure (Z+1) véhicule une certaine quantité de nitrate. Cette quantité de nitrates est supposée se mélanger complètement avec l'eau dans la couche Z+1. Par la suite, l'excès d'eau dans cette couche (en comparaison avec la capacité au champ) est drainé à la couche suivante (Z+2) avec sa nouvelle concentration de nitrates. Le processus se poursuit vers le bas du profil ou de la couche dans laquelle la teneur en eau reste inférieure à la capacité au champ. L'épaisseur des couches (1 cm) a été choisie pour être suffisamment mince pour atteindre une convergence lors du calcul du déplacement de nitrates.

Pour certains mécanismes comme celui de l'azote, le choix des paramètres sous STICS est plus original que dans d'autres modèles et par conséquent, les paramètres d'entrée doivent être testés dans diverses situations expérimentales et par une analyse de sensibilité. Le contexte d'applications agronomiques de STICS exclut les situations qui ne

sont pas prévues par le modèle : une forte sécheresse, la présence permanente d'ammonium dans les sols, les sols hydromorphes, fumier alimentation, terrain en pente et la pénurie de nutriments autres que l'azote. (Brisson. N *et al*., 1998.)

Bien qu'il soit utilisé par de nombreux organismes de recherche pour sa grande précision sur la simulation des modalités testées, STICS reste un modèle lourd et qui ne peut pas être utilisé par des conseillers sur terrain.

DAE-G : Diagnostic Agro-Environnemental Géographique

Certains outils de diagnostics peuvent également être utilisés afin d'estimer les fuites de nitrates en surface et en profondeur à l'échelle de la parcelle. Parmi eux, nous pouvons citer le DAE-G (outils de Diagnostic Agro-Environnemental Géographique).

Co-conçu par Agrotransfert, la chambre d'agriculture de Picardie, le PERI et l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais entre 2003 et 2007, cet outils à pour objectif d'évaluer les risques d'impacts de l'exploitation agricole sur l'environnement en croisant la sensibilité du milieux avec les pratiques agricoles, à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation sur une campagne culturale donnée. (S. DEBOMY, 2013)

Pour cela, le DAE-G nécessite une saisie informatique parcelle par parcelle des données issues des informations collectées chez l'exploitant grâce à des documents spécifiques. Le DAE-G traite de diverses thématiques environnementales : l'eau, le sol, l'air, la biodiversité, les déchets, l'énergie et les nuisances. Sur celle qui nous intéresse, l'eau, il y a une sub-division des thématiques et risques mesurés. On en dénombre une dizaine dont le risque de pollution diffuse des eaux de profondeur par les nitrates qui est calculé grâce à quatre indicateurs intermédiaires : potentiel de lessivage du sol vis à vis des nitrates, vulnérabilité des aquifères, balance azotée et gestion de l'interculture. (S. DEBOMY, 2013)

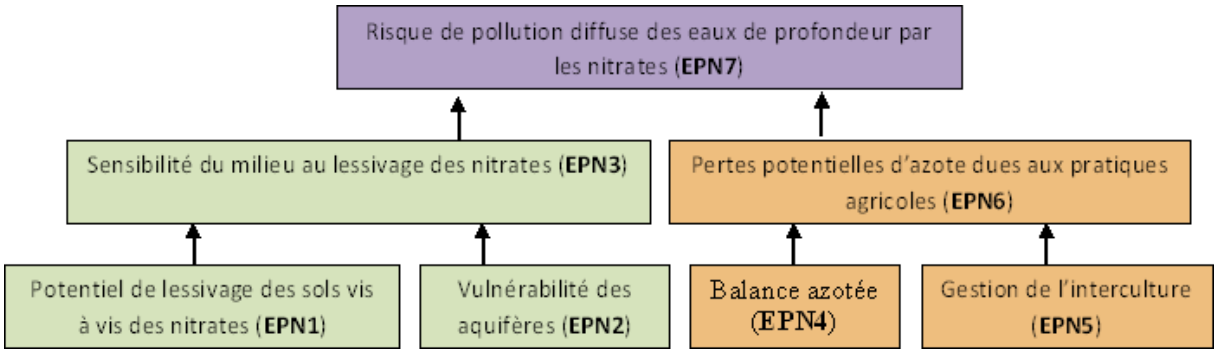
Risque de pollution diffuse des eaux de profondeur par les nitrates (EPN7)
Sensibilité du milieu au lessivage des nitrates (EPN3)
Pertes potentielles d'azote dues aux pratiques agricoles (EPN6)
Potentiel de lessivage des sols vis à vis des nitrates (EPN1)
Vulnérabilité des aquifères (EPN2)
Balance azotée (EPN4)
Gestion de l'interculture (EPN5)

Figure 4 : Agrégation des indicateurs intermédiaires pour évaluer le risque de pollution diffuse des eaux de profondeur par les nitrates

A partir des valeurs des indicateurs, cinq classes de risque sont constituées allant de très faible (vert) à très fort (rouge). Les limites de classe sont déterminées à dire d'expert et les résultats après exécution de l'outil sont restitués sous différentes formes : tableaux récapitulatifs, cartes représentant les parcelles reprenant le code couleur des cinq classes de risque ainsi qu'un rapport explicatif rédigé de l'analyse des résultats. (S. DEBOMY, 2013)

Le DAE-G compte parmi ses utilisateurs des techniciens et conseillers agricoles ainsi que des enseignants et étudiants. Cependant, il est à noter que l'outil a été paramétré pour

une utilisation appliquée en Picardie, l'Ile-de-France et Seine-Maritime sur des exploitations de grandes cultures et de polyculture-élevage. (S. DEBOMY, 2013)

MERLIN : Méthode de hiErarchisation du Risque de LIxiviation du Nitrate

Merlin est un outil traitant du « risque de pollution des eaux de profondeur par les nitrates ». Il permet d'évaluer de façon qualitative le risque de lessivage des nitrates en fonction de la situation culturale, traduite par la succession des cultures et les pratiques de fertilisation azoté adoptées par l'exploitant et en fonction de la nature du milieu.

La méthode a été élaborée par la chambre régionale d'agriculture du Poitou-Charentes en 2001, qui l'a adaptée aux pratiques agricoles de sa région. Il en résulte que certaines cultures comme la betterave et le chanvre n'ont pas été recensées dans la base de données de l'outil, car elles sont absentes des systèmes culturaux (rotation) en Poitou-Charentes. Cela-dit, l'outil a déjà été adapté aux pratiques culturales d'autres régions.

MERLIN est adapté aux exploitations ayant une activité de polyculture, polyculture élevage, grandes cultures et cultures particulières mais pas à l'élevage. Il a été conçu pour réaliser des diagnostics de lessivage des nitrates à l'échelle de la parcelle, mais on peut l'utiliser également à l'échelle d'une exploitation et même d'un territoire, en répétant le diagnostic plusieurs fois. Il peut être utilisé par un technicien agricole, un agriculteur et dans un but pédagogique.

Cette méthode se présente sous forme d'une application informatique, développée sous Excel. L'estimation des risques de lixiviation de l'azote par MERLIN, se traduit par une note finale, issue de l'agrégation de 3 indicateurs exprimés en classe, non additifs mais pondérés :

- EQUIF : indicateur de l'équilibre de fertilisation
- IC : indicateur de gestion de l'interculture (basé sur l'aptitude du sol à absorber l'azote avant la reprise du drainage)
- SENSIB : sensibilité du sol à l'infiltration

Les données d'entrée nécessaires à l'élaboration de ces indicateurs permettent de caractériser l'itinéraire technique pratiqué sur la parcelle (ex : rendement, gestion des résidus et dose d'azote appliquée sur la culture précédente) et les caractéristiques de cette dernière (ex : type de sol et réserve utile).

La collecte des données à l'échelle de la parcelle est estimée à 5 minutes, comme leur saisie et leur restitution ainsi que l'élaboration du plan d'action. Il faut cela-dit, 12 fois plus de temps pour réaliser le même travail à l'échelle de l'exploitation.

Les résultats sont donnés sous forme de données brutes. Ils ne sont ni représentés sous forme de graphique ni de rapport. Il parait donc évident que, même si l'exploitant peut saisir les données de façon autonome, il a besoin de l'œil d'un expert dans le domaine pour interpréter les résultats, identifier les pratiques induisant une éventuelle pollution et élaborer un plan d'action.

L'outil est gratuit pour les chambres départementales de Poitou-Charentes. En revanche, la formation d'environ deux jours est payante pour tout usager en dehors de cette

région. Il n'existe pas d'aide à l'utilisation de l'outil mais un mode d'emploi succinct a été créé sur le premier onglet du fichier Excel. L'interface est cependant très intuitive. Enfin, une fiche de présentation de l'outil est disponible sur le site de PLAGE. (S. MINETTE, 2012.)

INDIGO

La méthode INDIGO a été conçue entre 1994 et 2003. L'outil informatique associé a vu le jour en 2008. (C. BOCKSTALLER, C. RABOLIN. 2009.) Il a été élaboré par l'INRA et l'Université de Lorraine et conçu en fonction des pratiques culturales observées dans le nord de la Loire, mais son adaptation à toutes les autres régions est possible. (C. BOCKSTALLER, C. RABOLIN. 2011.)

Cet outil, est compatible pour les exploitations ayant une activité de grandes cultures, de polyculture-élevage, d'élevage et de viticulture mais ne prend pas en compte les thématiques spécifiques à l'élevage. Il permet de calculer de nombreux indicateurs d'évaluation de la pollution à partir de la matière organique, du phosphore, des produits phytosanitaires, et, en ce qui nous concerne : de l'azote, avec l'indicateur azote (IN).

Il faut en moyenne une journée pour collecter les données, une journée pour les saisir et ½ journée pour restituer les résultats et élaborer un plan d'action. C'est un outil qui nécessite une grande disponibilité de l'utilisateur, d'autant plus que lors de la première utilisation, de nombreuses données, notamment climatiques, sur le sol et l'historique sont à saisir et demandent beaucoup de temps.

Il peut être utilisé à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation. Un lien informatique est envoyé par mail pour pouvoir télécharger le fichier. L'obtention de la licence est payante pour les exploitants.

L'atout majeur de cet outil est la sensibilité de ses indicateurs à l'échelle de la parcelle et la prise en compte du milieu dans ses calculs. De plus, on peut ne calculer qu'un indicateur, ce qui est un gain de temps lorsque que l'on s'intéresse, comme nous, uniquement aux risques liés à l'azote.

L'indicateur spécifique à l'azote (IN) repose sur 3 modules : la pertes par lessivage NO_3, la perte par émission N_2O et la perte par volatilisation NH_3. Ils prennent en compte, entre autres, les itinéraires culturaux par parcelle, les intercultures suivantes, les phénomènes de volatilisation, de lixiviation, les éventuelles surfertilisations et des résidus de récoltes, source potentielle d'azote.

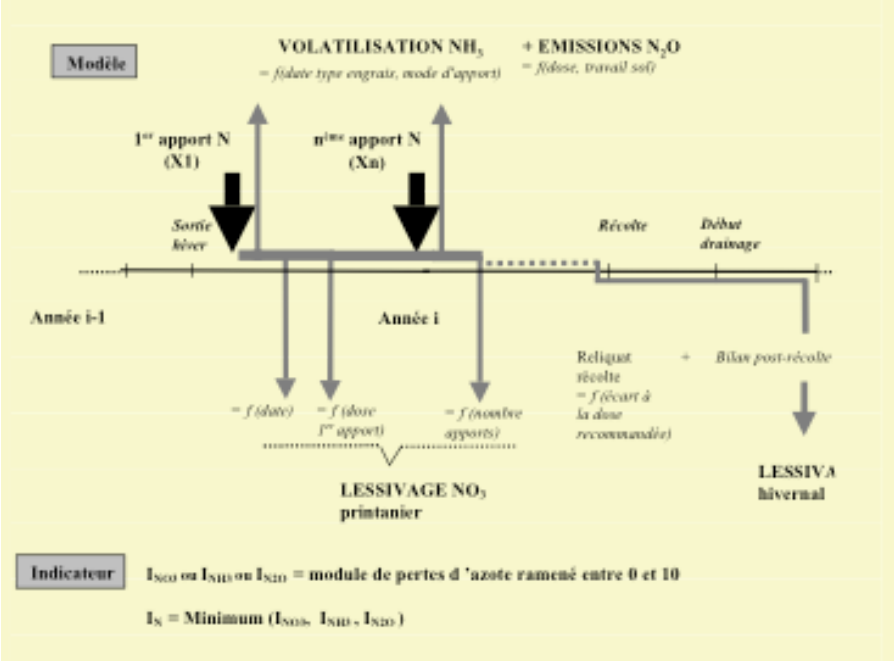

Figure 5 : Présentation générale de la démarche de construction de l'indicateur azote. Entre parenthèse sont données les pratiques culturales prises en compte. Des caractéristiques des sols st des données climatiques moyennes entrent aussi dans l'estimation des différents types de pertes d'azote

(Source : Fiche outils INDIGO Version 1.9 (grandes cultures))

Les résultats, note comprise entre 0 (risque maximal pour l'environnement) et 10 (risque nul), avec une valeur recommandée à 7, sont restitués sous forme de graphiques en radar, diagrammes en bâtons et sous forme de tableaux, sur lesquels les notes de l'exploitation et les notes minimum recommandées sont indiquées en parallèle pour pouvoir faciliter la comparaison. L'indicateur se calcule dans un premier temps au niveau parcellaire puis, dans un second temps, au niveau de l'exploitation qui est obtenue par une moyenne pondérée des valeurs parcellaires au prorata de la surface de chaque parcelle. (C. BOCKSTALLER, C. RABOLIN. 2009.)

Pour déterminer les valeurs représentant les pertes maximales acceptables d'azote sur une parcelle, l'équipe conceptrice de l'outil s'est appuyée sur les valeurs réglementaires en rigueur. Par exemple, pour le lessivage, les chercheurs se sont appuyés sur les valeurs seuil de potabilité de l'eau, pour la volatilisation, sur les valeurs seuil en NH_3 atmosphérique. (C. BOCKSTALLER, C. RABOLIN. 2011.)

Par ailleurs, il est à noter qu'il existe des outils tel que PERSYST (PERformances agronomiques, des SYStèmes de culture) reprenant cet indicateur azote de la méthode INDIGO qui permettent d'estimer les émissions d'azote dans les milieux : nitrates dans les eaux (pendant et après cultures) et NH_3 et N_20 dans l'air. (L. GUICHARD, 2012.)

Territ'Eau

Territ'Eau est un outil mettant à disposition un référentiel de connaissances sur les transferts d'eau et d'éléments associés à l'échelle du bassin versant, sur le rôle des éléments du paysage. Il évalue les impacts de l'aménagement de l'espace rural, la gestion du paysage et des pratiques agricoles sur la qualité des eaux de surface (nitrates, produits phytosanitaires, phosphore, matière organique dissoute, bactéries) à l'échelle du bassin

versant et de la parcelle et hiérarchise les origines pour orienter vers des solutions performantes.

La méthode a été élaborée par la chambre régionale d'agriculture de Bretagne, Agrotransfert, AgroCampus et l'INRA en 2009 et est applicable en Bretagne, en Lorraine ainsi qu'en pays de Loire.

Territ'Eau est adapté aux exploitations ayant une activité de polyculture, polyculture élevage, grandes cultures ou à élevage seul. Il a été conçu pour réaliser des diagnostics de lessivage de nitrates à l'échelle du bassin versant, mais on peut également l'utiliser à l'échelle parcellaire. Il peut être utilisé par un technicien agricole, un agriculteur et/ou dans un cadre pédagogique.

Cette méthode se présente sous forme d'une application informatique et contient plusieurs volets dont un sur les nitrates. L'outil permet l'attribution d'une note de lessivage des nitrates à l'échelle de la parcelle en fonction de la sensibilité au lessivage selon le contexte pédo-climatique, des pertes d'azote liées à la rotation culturale et des pertes d'azote liées à la surfertilisation. Il attribue également une note de pertes de nitrates à l'échelle du bassin versant en tenant compte de la capacité dénitrifiante des zones humides, des espaces non agricoles.

Territ'Eau travaille aussi bien sur une échelle temporelle (rotation culturale ou système de cultures) que spatiale (parcelle, sous bassin versant, bassin versant) pour appliquer une méthode d'agrégation pour chaque polluant. L'agrégation des données est réalisée par un groupe d'experts à l'issue de la collecte des données qui est estimée à une demi-journée par exploitation.

Les résultats sont restitués sous forme de tableaux récapitulatifs ou de données cartographiques respectant un code couleur correspondant à des classes de risque dont les valeurs seuil ont été déterminées à partir des normes de qualité des eaux.

L'outil est libre d'accès sur le site d'agrotransfert Bretagne mais il existe des formations pour sa prise en main. (S. GUIET, 2011)

Tableau de synthèse

Pour pouvoir comparer les outils présentés précédemment, nous avons réalisé un tableau récapitulatif de leurs forces et leurs faiblesses.

Tableau des outils permettant l'estimation des fuites de nitrates dans les eaux de surface et eaux profondes à l'échelle de la parcelle.

Outils	Forces	Faiblesses
SWAT	Estimation de l'impact des pratiques agricoles sur l'eau et du sol dans les bassins versants importants et complexes, sur de longues périodes Simulation de la quantité de l'eau, qualité de l'eau et la croissance des cultures en même temps. Simulation du ruissellement des éléments nutritifs et à l'échelle de bassins versants et des sous-bassins	Modèle SWAT est à l'échelle du bassin versant (même s'il y a scission du BV en sous BV, le modèle reste imprécis pour l'échelle de l'exploitation)
STICS	Estimation précise des fuites de nitrates Multiplicité des paramètres influençant le lessivage de l'azote	Non utilisable sur le terrain Cadre d'application restreint aux situations extrêmes (sécheresse, pente forte du terrain…)
Merlin	Echelle de travail : parcelle Outil simple d'utilisation	Pas de prise en compte de l'inter-connectivité entre les parcelles Résultats sous forme de données brutes Cadre d'application restreint (sensibilité du milieu paramétré pour la région Poitou-Charentes et non applicable aux exploitations horticoles ou maraichères)
DAE-G	Outil accessible sur internet et avec représentation cartographique Agrégation d'indicateurs de natures différentes pour une prise en compte globale de la sensibilité du milieu et de ses caractéristiques avec les pratiques agricoles Différentes échelles d'application dont échelle parcellaire	Outil payant (Licence et formations) Saisie des données contraignante car elle se fait parcelle par parcelle Cadre d'application restreint (exploitations autres que grandes cultures ou polycultures élevage non éligibles), plus approprié aux régions Nord de la France.
INDIGO	Echelle de la parcelle et de	Modèle qui ne prend pas en

	l'exploitation Possibilité de ne calculer que les indicateurs qui nous intéresse et donc de gagner du temps Prise en compte de l'azote émis dans l'atmosphère et volatilisé Restitution des résultats complète, sous différentes formes	compte les spécificités liées à l'élevage Collecte, saisie des données et traitement des résultats long (2,5 jours) Fichier payant
Territ'Eau	Approche territoriale des pollutions diffuses Outil qui traite des eaux de surface Différentes échelle de restitution des résultats (dont l'échelle parcellaire) Libre accès à l'outil	Pas de prise en compte des risques pour les eaux souterraines, les pollutions ponctuelles, les espaces urbanisés Cadre restreint d'application (typologie d'exploitation, régions)

Conclusion

Les outils SWAT et STICS sont des modèles informatiques complexes nécessitant beaucoup d'informations, car leur fonctionnement dépend de nombreux paramètres. De plus, SWAT se place à l'échelle du bassin versant et non de la parcelle. Il n'est donc pas pertinent pour notre cas d'étude.

Merlin quant à lui, est exploitable uniquement sous Excel 1997, et devient obsolète malgré sa facilité d'utilisation.

Nous utiliserions plutôt le DAE-G ou INDIGO, même si se sont des outils qui nécessitent de nombreuses heures de travail car ils demandent un temps de saisie et de collecte de données important. Ils ont l'avantage de pouvoir se placer aussi bien à l'échelle de la parcelle que de l'exploitation. Cependant, ils ne traitent que les risques de pollutions des eaux profondes par les nitrates et non des eaux de surface.

Il est donc nécessaire de compléter l'analyse des fuites en nitrate des parcelles avec l'outil Territ'eau qui est le seul pouvant évaluer les risques de fuites de nitrates dans les eaux de surface.

Liste des références bibliographiques

S. AKHAVANA, J. ABEDI-KOUPAIA, S-F. MOUSAVIA, M. AFYUNIB, S-S. ESLAMIANA, K C. ABBASPOURC, 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan–Bahar Watershed, Iran. Agriculture, Ecosystems and Environment. Volume 139, Issue 4, 675–688. [PDF en ligne] Date de consultation : 10/12/13.
Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880910002835>

ARVALIS, 2013. Quelle est l'efficacité des cultures intermédiaires pièges à nitrate ? [en ligne]. Consulté le 16/12/13. Disponible sur : http://www.arvalis-infos.fr/view.jspz;jsessionid=F007E058660AE4CFDD6EAF4FB2B38DA6.tomcat1?obj=arvstatiques&id=747&syndtype=null&hasCookie=false&hasRedirected=true

C. BOCKSTALLER, C. RABOLIN, 2011. PLAGE, INDIGO (version 2). [PDF en ligne]. Date de consultation : 11/12/13.
Disponible sur : <http://www.plage-evaluation.fr/webplage/images/stories/pdf/ficheindigo.pdf>

C. BOCKSTALLER, C. RABOLIN, 2009. PLAGE, INDIGO version 1.9 (grande culture). [PDF en ligne]. Date de consultation : 11/12/13.
Disponible sur : <http://www.agro-transfert-rt.org/index.php/fr/.../doc.../266-fiche-outil-indigo>

N. BRISSON, B. MARY, D. RIPOCHE, M-H. JEUFFROY, F. RUGET, B. NICOULLAUD, P. GATE, F. DEVIENNE-BARRET, R. ANTONIOLETTI, C. DURR, G. RICHARD, N. BEAUDOIN, S. RECOUS, X. TAYOT C, D. PLENET, P. CELLIER, J-M. MACHET, J-M. MEYNARD, R. DELÉCOLLE, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 18:311-346. [PDF en ligne] Date de consultation : 10/12/13. Disponible sur : <http://www.agronomy-journal.org/articles/agro/pdf/1998/05/Agronomie_0249-5627_1998_18_5-6_ART0001.pdf>

BUREAU D'ETUDES INDUSTRIELLES, *Energies Renouvelables et Environnement* (BEI, ERE)**,** 2012. Présentation du modèle SWAT. [en ligne]. Date de consultation : 11/12/13.
Disponible sur : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g05/presentation-du-modele-swat>

S. DEBOMY, 2013. PLAGE, DAE-G (version 2). [PDF en ligne]. Date de consultation : 10/12/13.
Disponible sur : <http://www.plage-evaluation.fr/webplage/images/stories/pdf/fichedaeg.pdf>

D. DELCOUR *et al.*, 2013. Rapport : Plan d'action relatif à une meilleure utilisation de l'azote dans l'agriculture. Ministères de l'écologie et de l'agriculture [en ligne]. Consulté le 10/12/13. Disponible sur : http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_final_cle819f98.pdf
L. ARNAUDET et A.S. BONNET-LEBRUN., 2010. Agriculture et ressources naturelles : le cas de l'eau. Ecole nationale supérieure : environnement et société [en ligne]. Consulté le 10/12/13. Disponible sur : http://www.environnement.ens.fr/ressources/resultats-des-ateliers/nourrir-le-monde/limites-actuelles/degradation-des-ecosystemes/article/eau-et-nitrates

L. GUICHARD, 2012. PLAGE, PERSYST (version 1.3). [PDF en ligne]. Date de consultation : 10/12/13.
Disponible sur : http://www.plage-evaluation.fr/webplage/images/pdf/fichepersyst.pdf

S. GUIET, 2011. PLAGE, Territ'Eau. [PDF en ligne]. Date de consultation : 14/12/13. Disponible sur : <http://www.plage-evaluation.fr/webplage/images/stories/pdf/ficheterriteau.pdf>

INR, 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen des cultures intermédiaires. . [en ligne]. Consulté le 11/12/13. Disponible sur : http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Cultures-intermediaires

G. JEGOA, J.M. SANCHEZ-PEREZC, 2010. Predicting soil water and mineral nitrogen contents with the STICS model for estimating nitrate leaching under agricultural fields. Agriculture, Ecosystems and Environment 139:675-688. [PDF en ligne] Date de consultation : 10/12/13. Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377412000236>

E. JUSTE, 2013. Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Extrait du colloque « Réduire les fuites de nitrates au moyen de cultures intermédiaires». le 28 juin 2012. Maison de l'Horticulture. Paris [en ligne]. Consulté le 14/12/13. Disponible sur : http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/pluginfile.php/1464/mod_resource/content/0/Expertise%20scientifique%20cultures%20interm%C3%A9diaires%20-%20synth%C3%A8se.pdf

S. MINETTE, 2012. PLAGE, MERLIN (version 2). [PDF en ligne]. Date de consultation : 10/12/13. Disponible sur : http://www.plage-evaluation.fr/webplage/images/stories/pdf/fichemerlin.pdf

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 1991. Directive 91/676/CEE (Directive nitrates). [en ligne]. Consulté le 14/12/13. Disponible sur : http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28013_fr.htm

Ministère du développement durable et de l'énergie, 2013. Nitrates et autres macropolluants dans les eaux. [en ligne]. Consulté le 09/12/13. Disponible sur : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/2000/0/evolution-nitrates-eaux-souterraines.html

J.MOLENAT *et al*, 2012. Les pollutions de l'eau dans les bassins versants agricoles : natures, sources et mécanismes de transfert. Agro-transfert Bretagne : Territ'eau. [en ligne]. Consulté le 15/12/13. Disponible sur : http://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_Eau/CONNAISSANCES/Polluants_de_l_eau/nitrates.asp

E. NOVINCE *et al*, 2007. La réduction des nitrates d'origine agricole. Portail de l'information environnementale en Bretagne. [en ligne]. Consulté le 15/12/13. Disponible sur : http://www.bretagne-environnement.org/Eau/Les-pollutions-et-menaces/Nitrates/La-reduction-des-nitrates-d-origine-agricole

Université virtuelle Environnement et développement durable, 2009. Les voies de transfert des nitrates et des phosphates. Université de Nantes. [en ligne]. Consulté le 14/12/13. Disponible sur : http://uved.univ-nantes.fr/sequence2/html/ressources/documents/Annexe-Lesvoiesdetransfert.pdf